ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ, НАУКИ О МАТЕРИАЛАХ, МЕТАЛЛУРГИЯ







Научная статья
УДК 621. 762. 1
https://doi.org/10.23947/2541-9129-2022-3-68-74

Технологические способы борирования изделий из нержавеющих сплавов работающих в агрессивных условиях

М. С. Егоров, Ю. М. Домбровский, Г. Г. Цорданиди, Р. В. Егорова
Донской государственный технический университет (г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Введение. Долговечность и другие эксплуатационные характеристики деталей машин в значительной мере определяются физико-химическим состоянием тонких поверхностных слоев. Локализация упрочняющих процессов в этих слоях служит значительным резервом повышения ресурса деталей при сокращении затрат на изготовление материалов. Одним из наиболее прогрессивных направлений упрочняющей технологии является нанесение защитных покрытий на рабочие поверхности деталей машин.
В статье исследован процесс спекания прессовок из стали ПХ23Н18 в порошке карбида бора в контейнерах с плавким затвором. Установлено, что спекание в таких контейнерах обеспечивает получение высоких механических характеристик спечённой стали при хорошей воспроизводимости процесса спекания.
Постановка задачи. Для повышения коррозионной стойкости, а также улучшения износостойкости трущихся поверхностей изделий и узлов деталей машин, работающих в агрессивных средах, необходимо выбрать рациональную технологию химико-термической обработки, позволяющей улучшить механические и технологические свойства изделий.
Теоретическая часть. Проанализировано применение различных способов борирования нержавеющей стали, рассмотрены зависимости изменения механических и технологических свойств образцов от различных схем борирования и способов получения образцов.
Выводы. Установлено, что повышение прочности у образцов, подвергнутых борирующему спеканию в автономной газовой среде, произошло благодаря отсутствию окисления и глубинного насыщения бором (объемного упрочнения) посредством парогазовой фазы. Применение контейнерной технологии позволяет не только упростить технологию, но и обеспечить сохранение свойств материала, независимо от наличия в термическом цехе защитной газовой среды.

Ключевые слова: нержавеющая сталь, борирование, окисление, спекание, механические свойства.

Для цитирования: Технологические способы борирования изделий из нержавеющих сплавов работающих в агрессивных условиях / М. С. Егоров, Ю. М. Домбровский, Г. Г. Цорданиди, Р. В. Егорова // Безопасность техногенных и природных систем. — 2022. — № 3. — С. 68–74. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2022-3-68-74

Original article

Technological Methods of Boriding Products from Stainless Alloys Operating in Aggressive Conditions

M. S. Egorov, Yu. M. Dombrovskiy, G. G. Tsordanidi, R. V. Egorova
Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Introduction. The durability and other performance characteristics of machine parts are largely determined by physical and chemical state of thin surface layers. The localization of hardening processes in these layers serves as a significant reserve for increasing the service life of parts while reducing the cost of manufacturing materials. One of the most

progressive directions of strengthening technology is the application of protective coatings on the working surfaces of machine parts.
The article investigates the process of sintering compacts from steel PKh23N18 in boron carbide powder in containers with a fusible seal. It has been established that sintering in such containers provides high mechanical characteristics of sintered steel with good reproducibility of the sintering process.
Problem Statement. To improve corrosion resistance, as well as to improve wear resistance of friction surfaces of products and machine parts operating in aggressive environments, it is necessary to choose a rational technology of chemical-thermal treatment that allows increasing the mechanical and technological properties of products.
Theoretical Part. As a theoretical description, the use of various methods of stainless steel boriding is analyzed, and the dependences of changes in the mechanical and technological properties of samples on various boriding schemes and methods for obtaining samples are considered.
Conclusions. It was established in the work that the increase in strength of samples subjected to boriding sintering in an autonomous gaseous medium occurred due to the absence of oxidation and deep saturation with boron (volumetric strengthening) through the vapor-gas phase. The use of container technology makes it possible not only to simplify the technology, but also to ensure the preservation of material properties, regardless of the presence of a protective gaseous medium in the thermal shop.

Keywords: stainless steel, boriding, oxidation, sintering, mechanical properties.

For citation: Egorov M. S., Dombrovskiy Yu. M., Tsordanidi G. G., Egorova R. V. Technological Methods of Boriding Products from Stainless Alloys Operating in Aggressive Conditions. Safety of Technogenic and Natural Systems, 2022, no.3, pp. 68–74. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2022-3-68-74

Введение. Известно, что эффективным способом повышения физико-механических свойств спеченных материалов, а также придания им комплекса требуемых эксплуатационных характеристик является химико-термическая обработка [1–4]. Борирование спеченных материалов позволяет повысить их твердость, износостойкость, а также кислото- и теплостойкость [3–5]. Ранее [6] был исследован процесс борирующего спекания порошков нержавеющих сталей в смеси карбида бора с бурой в защитной среде осушенного водорода. Это позволило создать корозионно- и износостойкую борированную пару трения, предназначенную для работы в агрессивных жидких средах. Однако для внедрения того или иного вида химико-термической обработки в производство важное значение приобретает сохранение надежности (стабильности) и простоты технологии при переходе от лабораторных к производственным условиям.

Целью работы является исследования процесса борирования при различных температурах, проведение микроструктурного анализа поверхностного слоя, а также исследование процесса спекания пористых заготовок их стали ПХ23Н18 совместно с порошком карбида бора в контейнерах с плавким затвором. Необходимо установить зависимости изменения удельного сопротивления, механических свойств от плотности получаемых прессовок и способа борирующего спекания.

Постановка задачи. Для создания износостойких деталей, обладающих высокими технологическими и механическими свойствами, необходимо обеспечить надежную химико-термическую технологию, которая будет внедрена в производство. Для этого необходимо проведение серии экспериментальных работ по определению зависимостей механических и технологических свойств от способа борирования, пористости образцов.

Теоретическая часть. Технология борирующего спекания пористых заготовок в засыпке из смеси карбида бора с бурой для производственных условий сложна, так как извлечение деталей из спекшейся засыпки (за счет плавления и кристаллизации буры) и их очистка от налипшей буры и карбида бора представляет определенные трудности. Кроме того, такую засыпку перед повторным употреблением необходимо размалывать и дошихтовывать свежей смесью. Поэтому необходимо было исследовать возможность замены, спекающейся борирующей засыпки на неспекающуюся.

В работах [7–9] установлено, что при борировании литых сталей в техническом карбиде бора образуется плотный боридный слой, порошок не спекается и может быть многократно использован без каких-либо дополнительных операций.

Однако борирующее спекание в карбиде бора в проточном осушенном водороде с точкой росы –30°С пористых образцов из стали ПХ23Н18 привело к их частичному отслоению.

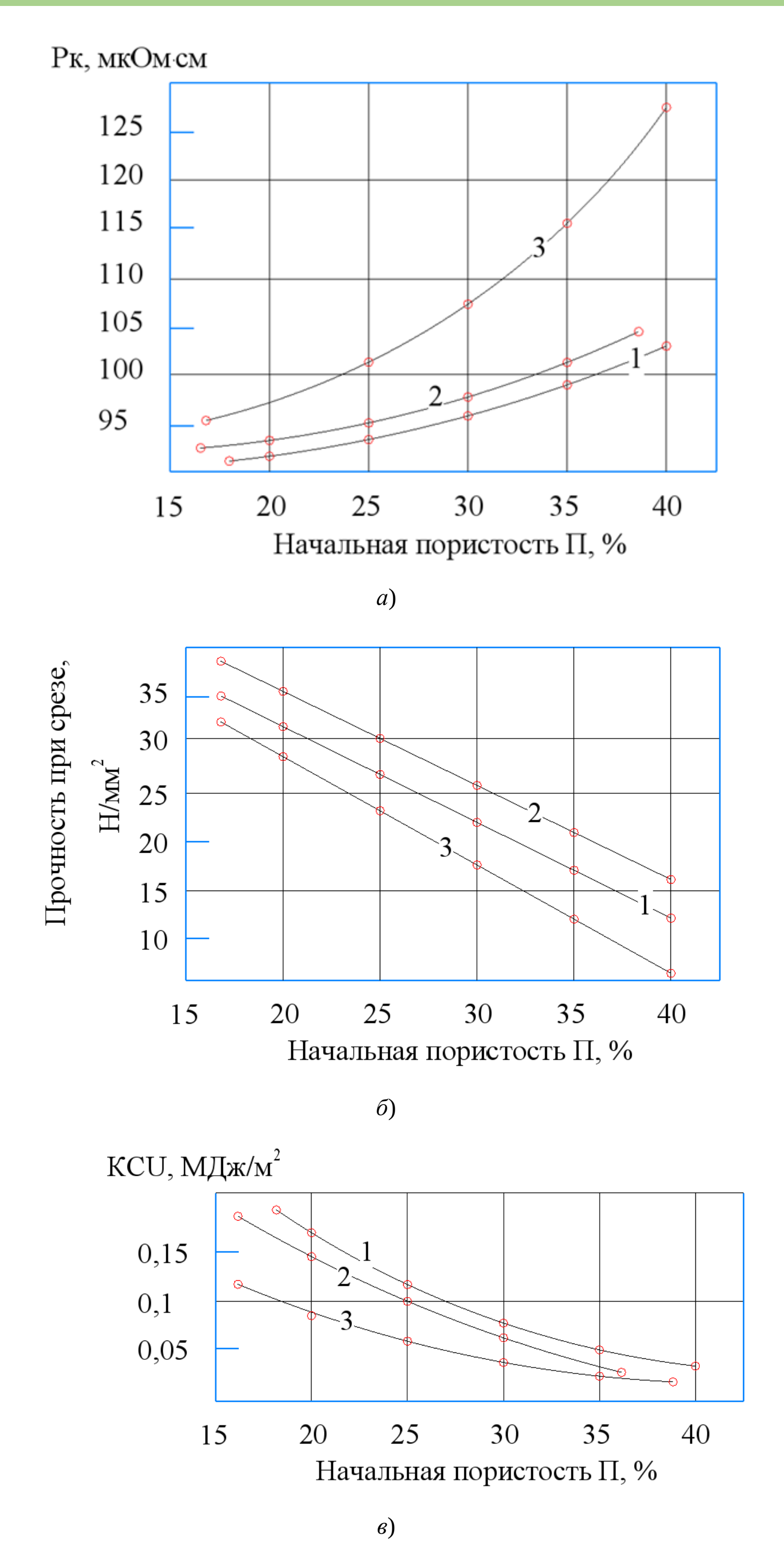


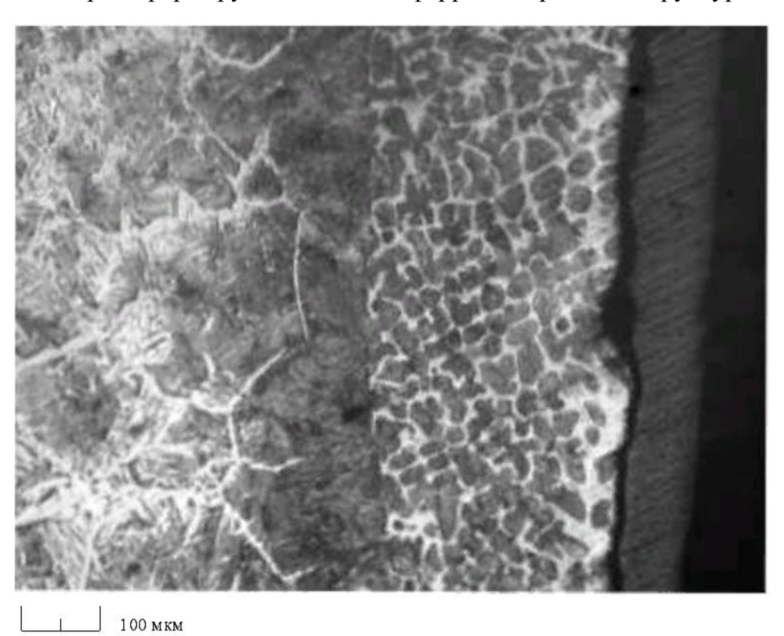
Рис. 1. Зависимость изменения удельного электросопротивления (а), прочности при срезе (б) и ударной вязкости (в) стали ПХ23Н18 от начальной пористости и способа борирования:
1 — образец содержищий буру, спекание в токе водорода с точкой росы –30°С; 2 — образец прокаленный B_4C, спекание в контейнерах с плавким затвором; 3 — образец прокаленный B_4C, спекание в токе водорода с точкой росы –30°С

Об этом свидетельствует пониженная прочность и более высокое электросопротивление образцов, подвергнутых борирующему спеканию в карбиде бора (рис.1 а, кривая 3), по сравнению с образцами прошедшими тот же режим борирующего спекания, но в засыпке, содержащей буру (кривая 1). Поэтому представлялось целесообразным применить для борирующего спекания в карбиде бора контейнеры с плавким затвором, которые, как показано в [10], позволяют спекать нержавеющую сталь без следов окисления. Образцы их нержавеющей стали ПХ23Н18 (размером 5×4×40 мм) разной пористости спекали в атономной газовой среде (в контейнере с плавким затвором) в засыпке из карбида бора.

Исследование глубины боридного слоя, прочности при срезе, ударной вязкости и электросопротивления образцов, подвергнутых борирующему спеканию, показывает (рис. 1 а, кривые 1–3), что эти характеристики, несмотря на идентичную температуру и время выдержки, существенно зависят от совокупности свойств борирующей засыпки и защитной среды.

Исследования режима борирования проводили при различных температурах. Образцы нагревали до температур 1050–1150°С с шагом в 50°С. Время обработки при всех температурах составляло 240 сек, плотность тока — 0,4–0,7 А/см^2.

Анализ полученных данных, показывает, что при нагрев образцов до температуры 1150°С способствовал формированию боридной эвтектики, микротвердость которой составляет 16 Гпа (светлые зоны) и ферритокарбидной основы микротвердость которой равна 5 ГПа (рис. 2). Далее следует переходный науглероженный подслой, за которым формируется исходная феррито-перлитная структура образца.



100 мкм

Рис. 2. Боридная эвтектика и исходная феррито-перлитная структура образца после нагрева до температуры 1050°С

Для определения содержания элементов в боридной эвтектике и ферритокарбидной основе слоя был выполнен микрорентгеноспектральный анализ. Изображения борированного слоя, полученные на сканирующем электронном микроскопе, представлено на рис. 3.

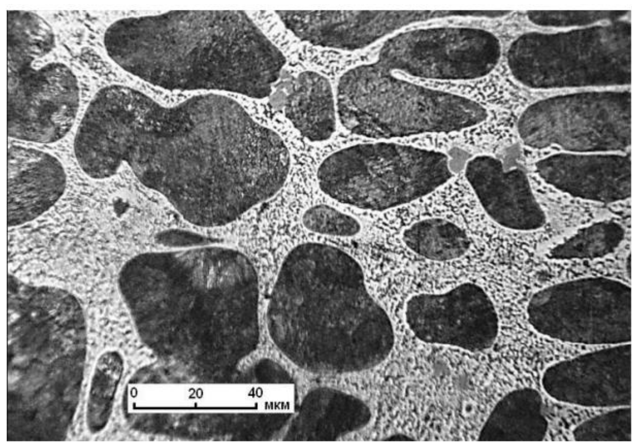


Рис. 3. Микроструктура боридной эвтектики после нагрева до температуры 1050°С, полученная на сканирующем электронном микроскопе

Рентгеновским фазовым анализом (РФА) показано присутствие в диффузионном слое борированного образца боридов Fe_2B и цементита Fe_3C (рис. 4). Кроме того, на дифрактограмме обнаружены рентгеновские дифракционные линии карбида бора $B_{11,5}C_{2,85}$ с соотношением B:C, несколько отличающимся от нормальной стехиометрии карбида B_4C.

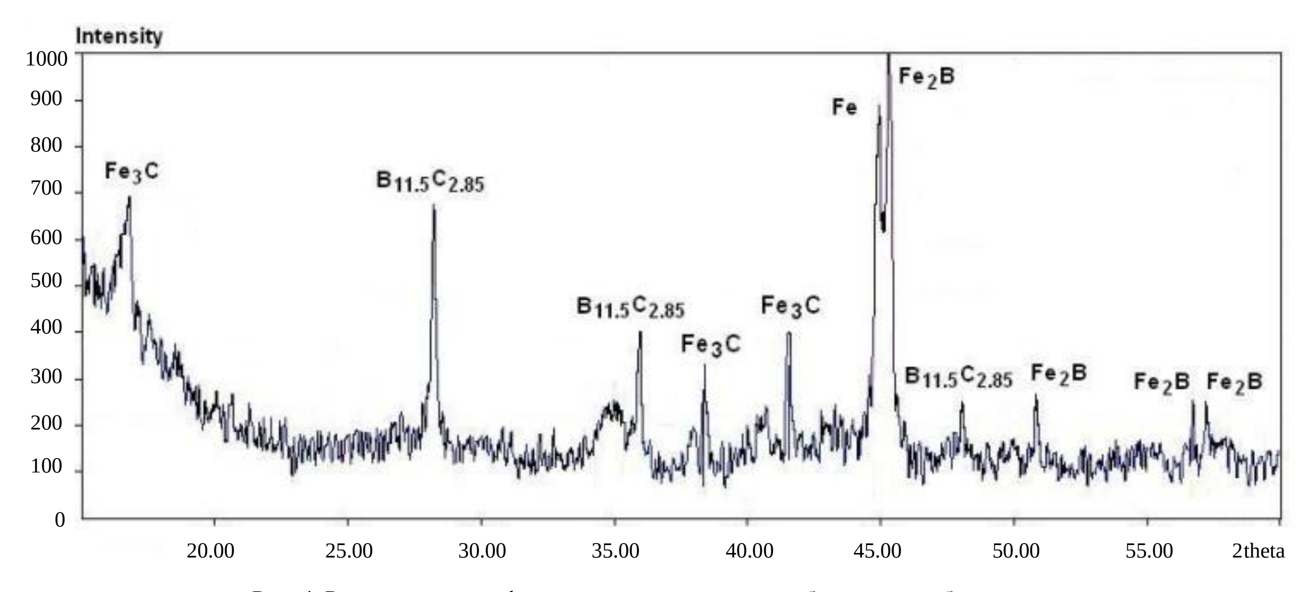


Рис. 4. Рентгеновская дифрактограмма поверхности образца после борирования

Результатами эксперимента показано, что при нагреве образцов до температуры 1250°С боридного слоя выявлено не было (рис. 5). При макроструктурном анализе поверхности образцов были выявлены следующие дефекты в виде проплавления торцов и радиальной поверхности (изменение диаметра составило 0,5 мм в месте нагрева и 0,3 мм на торцах). Данное обстоятельство объясняется тем, что под действием высокой температуры образовавшаяся боридная эвтектика подплавляется и смещается к краю образца (к торцу). При отсутствии боридного слоя микротвердость стального материала составила 3,5 Гпа.

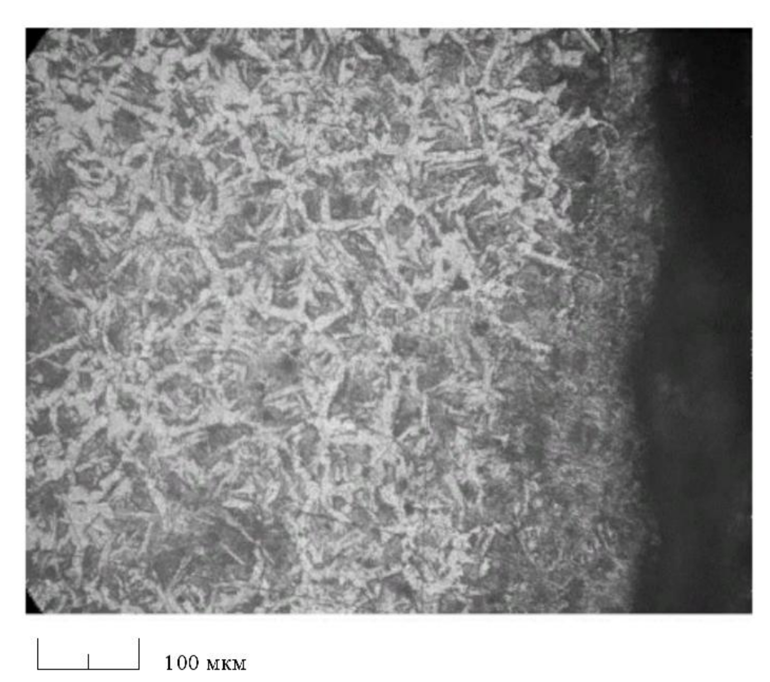


Рис. 5 Микроструктура поверхности стального образца, полученного при температуре 1250°С

Анализ экспериментальных данных показал, что образованные боридные слои на рассматриваемом материале имеют эвтектическую основу. При этом образцы подвергались температурному воздействию в течении 240 секунд. Образцы, нагретые до температуры 1160°С, имеют большую концентрацию бора на границах зерен, вследствие чего образуется больше жидкой фазы, которая способствует формированию более качественного слоя. В диапазоне температур 1050–1150°С на поверхности образцов получается боридный слой с местами боридной эвтектики по зернограничным участкам твердого раствора бора и углерода в Feα. Дальнейший рост температуры приводит к перенасыщению поверхностных границ бором до состояния максимальной эвтектической концентрации, подплавлению боридной эвтектики и ее зернограничному проскальзыванию.

В отличие от борирующего спекания в проточном водороде, спекание в контейнере с плавким затвором в автономной газовой среде, создаваемой разлагающимися при нагреве добавками (например, парафином или гидридом титана), позволяет полностью предохранить пористую нержавеющую сталь от окисления и способствует переносу массы как в результате насыщающей диффузии бора в неспеченный пористый материал по порам и границам зерен внутрь изделия, так и за счет собственно спекания. Наибольшую прочность при срезе имеют образцы, подвергнутые борирующему спеканию в контейнере с плавким затвором в неспекающейся борирующей засыпке (рис.1, кривая 2).

Выводы. Помимо температурного воздействия на значение межчастичного подплавления поверхности материала большое воздействие оказывает и время выдержки образцов при рассматриваемых температурных. При увеличении температуры процесса борирования происходит перенасыщение бором до максимальной эвтектической концентрации и ее зернограничному проскальзыванию. Очевидно, что для получения качественных слоев с участками боридной эвтектики по зернограничным участкам ферритокарбидной матрицы следует производить постоянный контроль температуры процесса и время выдержки материала при заданной температуре.

Полученные результаты испытаний показывают, что повышение прочности у образцов, подвергнутых борирующему спеканию в автономной газовой среде, произошло благодаря отсутствию окисления и глубинного насыщения бором (объемного упрочнения) посредством парогазовой фазы [11, 12]. Применение контейнерной (автономной) технологии для борирующего спекания пористых нержавеющих сталей в неспекающейся борирующей засыпке позволяет не только упростить технологию, но и обеспечить сохранение свойств материала, независимо от наличия в термическом цехе защитной газовой среды.

Библиографический список

1. Крукович, М. Г. Пластичность борированных слоев / М. Г. Крукович, Б. А. Прусаков, И. Г. Сизов. — Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2010. — 384 с.

2. Чернов, Я. Б. Борирование сталей в ионных расплавах / Я. Б. Чернов, А. И. Афиногенов, Н. И. Шуров. — Екатеринбург : УрОРАН, 2001. — 223 с.

3. Корнопольцев, В. Н. Получение комплексных боридных покрытий / В. Н. Корнопольцев // Ползуновский вестник. — 2012. — № 1/1. — С. 135–140.

4. Гурьев, А. М. Диффузионное борирование — перспективное направление в поверхностном упрочнении изделий из стали и сплавов / А. М. Гурьев, А. Д. Грешилов, Б. Д. Лыгденов // Ползуновский альманах. — 2010. — № 1. — С. 80–88.

5. Домбровский, Ю. М. Формирование композитного боридного покрытия на стали при микродуговой химико-термической обработке / Ю. М. Домбровский, М. С. Степанов // Известия высших учебных заведений. — 2015. — № 3. — С. 214–215.

6. Степанов, М. С. Формирование карбидного покрытия при микродуговом хромировании стали / М. С. Степанов, Ю. М. Домбровский // Упрочняющие технологии и покрытия. — 2015. — № 1. — С. 35–38.

7. Пустовойт, В. Н. Термодинамический анализ реакций в процессе микродугового хромирования стали / В. Н. Пустовойт, Ю. М. Домбровский, М. С. Степанов // Вестник Донского государственного технического университета. — 2014. — № 3 (78). — С. 118–12. https://doi.org/10.12737/5701

8. Способ поверхностного упрочнения металлических изделий : патент 2555320 Рос. Федерация; C23C28/04 В. Н. Пустовойт, Ю. М. Домбровский, М. С. Степанов. — № 2014101655/02 ; заявл. 21.01.2014 ; опубл. 10.07.2015 ; Бюл. № 19. — 6 с.

9. Stepanov, M. S. Microarc surface alloying of tool steels. / M. S. Stepanov, Yu. M. Dombrovskii, L. V. Davidyan // MATEC Web of Conferences. — 2018. — Vol. 226. — P. 03007. https://doi.org/10.1051/matecconf/201822603007

10. Давидян, Л. В. Структурно-фазовое состояние и свойства стали 20 после микродугового борирования / Л. В. Давидян, М. С. Степанов, Ю. М. Домбровский // Известия ВолгГТУ. Сер. «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении». — 2018. — № 3 (213). — С. 131–137.

11. Коротких, А. Г. Теплопроводность материалов: учеб. пособие / А. Г. Коротких. — Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2011. — 97 с.

12. Либенсон, Г. А. Процессы порошковой металлургии: учеб. пособие в 2- х томах / Г. А. Либенсон, В. Ю. Лопатин, Г. В. Комарницкий. — Москва : МИСИС, 2002. — Т. 2. — 320 с.

Поступила в редакцию 10.06.2022
Поступила после рецензирования 27.07.2022
Принята к публикации 27.07.2022

Об авторах:

Егоров Максим Сергеевич, заведующий кафедрой «Инженерная и компьютерная графика» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, доцент, ORCID, aquavdonsk@mail.ru

Домбровский Юрий Маркович, профессор кафедры «Физическое и прикладное материаловедение» Донского государственного технического университета, (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, профессор, ORCID, yurimd@mail.ru

Егорова Римма Викторовна, доцент кафедры «Кибербезопасность» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, доцент, ORCID, rimmaruminskaya@gmail.com

Цорданиди Георгий Георгиевич, доцент кафедры «Инженерная и компьютерная графика» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, доцент, ORCID, f972@yandex.ru

Заявленный вклад соавторов:

М. С. Егоров — формирование основной концепции, цели и задачи исследования, проведение расчетов, подготовка текста, формирование выводов; Ю. М Домбровский — формирование основной концепции, цели и задач исследования, научное руководство, подготовка текста, формирование выводов; Г. Г. Цорданиди — проведение расчетов, анализ результатов исследований, доработка текста, корректировка выводов; Р. В. Егорова — научное руководство, анализ результатов исследований, доработка текста, корректировка выводов.